

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergies renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

MODALISATION ET SIMULATION D'UNE MACHINE SYNCHRONNE À AIMANT PERMANENT ALIMENTÉ PAR UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Présenté par :

- DJEBLI ABDELHAFIDH
- MOKADDEM MOHAMED
- BENACHOUR ABDEKADER

Soutenu le : 30/06/2021 devant le Jury :

<i>M. BENMOHAMED Fayssal</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. TAIBI Ibrahim</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M. SEKKAL Mohammed</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciement

*Nous remercions ALLAH qui nous a donné la force et la patience
Pour terminer ce travail. Nous exprimons nos sincères
remerciements :*

*A nos parents pour leur contribution pour chaque travail que nous
avons effectué. A notre promoteur Mr. le docteur TAIBI Ibrahim
pour son aide et son dévouement.*

*A l'ensemble des enseignants du département science et technologie et
spécialement ceux de filière Electrotechnique. Nous remercierons
également tous les membres de jury pour avoir bien voulu évaluer
notre travail.*

*En fin Nous adressons notre remerciements les plus profonds et les
distinguées à tous ceux qui nous aidons de proche ou de loin pour
accomplir ce travail.*

Liste des figures

Figure (I.1) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9].....	14
Figure (I.2) : Cellule monocristalline. [14].....	16
Figure (I.3) : Cellule poly-cristalline. [14].....	17
Figure (I.4) : Cellule amorphe. [3].....	17
Figure (I.5) : Influence de T et Rs sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire.....	18
Figure II.4: Approximation de la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque..	22
Figure II. 5 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.....	22
Figure II.1: <i>Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une Commande MPPT sur charge DC[24].</i>	25
Figure II.2 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.....	27
Figure II.3. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé[25].....	27
.	

Figure II.4. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert[25].....	28
Figure II.5. : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [26].....	29
Figure II.6 :Schéma de converge vers le PPM par P&O[26].....	30
Figure II.7 : Algorithme de la méthode P&O[26].....	31
Figure (III.1) : l'association MSAP avec onduleur de tension.....	35
Figure (III.2) : Principe de la commande MLI.....	36
Figure (III. 3) : schéma équivalent de l'onduleur à MLI.....	37
Figure (III4) : Représentation d'une MSAP dans le repère triphasé.....	39
Figure (III.5) : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).....	42
Figure IV.2.schéma Simulink de générateur photovoltaïque.....	49
Figure. IV .3. Comportement des caractéristiques (IPV(VPV) et PV(VPV)sous l'influence de la température et de l'éclairement.....	49
figure (IV.5). : "schéma de l'onduleur sur Simulink.....	51
figure (IV.6) : "schéma de la commande MLI sur Simulink.....	51
figure (IV.7) : schéma Simulink de la machine synchrone a aimant permanent machine représenter dans le tableau suivant.....	52
Figure (IV.8) : schéma Simulation de système globale.....	53

Figure (IV-9) la tension de sortie de l'onduleur.....	53
Figure (IV.10) : Résultats de simulation de courant id.....	54
Figure (IV.10) Résultats de simulation de courant iq.....	54
Figure (IV.11) : Résultats de simulation de w	55
Figure (IV.11) : représente Résultats de simulation Cem.....	55

Liste des Tableaux

Tableau(I.1) : rendements PV pour différents matériaux. [18].....	15
Tableau (I.2): Potentiel d'Energie solaire en Algérie. [21].....	20
Tableau IV.1. Les caractéristique électrique de module PV étudié.....	48

Sommaire

Remerciements.

Dédicaces.

SOMMAIRE.

Liste des figures.

Introduction Générale.....11

CHAPITRE I

Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1) Introduction13

I.2 L'énergie renouvelable.....13

I.2.1 Historique.....13

I.2.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....13

I. 2.3 Le rendement PV15

I.2.4 Classement de cellule en fonction de leur rendement.....15

I.2.5 Technologie utilisée.....15

I.2.5.1/ Les cellules mono- cristallines :.....16

I.2.5.2/ cellule en silicium poly cristallin.....16

I.2.5.3 Silicium amorphe en couche mince17

I.2.6 Module photovoltaïque17

I.2.6.1 CARACTERISTIQUE D'UN MODULE SOLAIRE I-V, P-V :.....18

I.2.7 Types de systèmes photovoltaïques :.....19

I.2.7.1 Systèmes autonomes :.....19

I.2.7.2 Les systèmes raccordes au réseau19

I.2.7.3 System hybrides19

I.3 Gisement solaire20

I.4 Conclusion.....20

CHAPITRE II

GENERATEURS PHOTOVOLTAIQUES

II.1. INTRODECTION21

Sommaire

II.2.MODELISATION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE ..21	
II.2.1.MODEL ELECTRIQUE DE BASE.....21	
II.2.2.MODELE A UNE DIODE (SIMPLE EXPONENTIELLE):.....22	
II.3 ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR STATIQUE(CS)....25	
II.3.1 TYPE DE CONVERTISSEUR DC-DC26	
II.3.2 CONVERTISSEUR BUCK.....26	
II.3.3. CONVERTISSEUR BOOST.....27	
II.4 RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE(MPPT).....29	
II.4.1.LES TECHNIQUES DE COMMANDES MPPT29	
II .5.CONCLUSION.....32	

CHAPITRE III

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

III.1. Introduction34	
III.2. Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC) (onduleurs).....34	
III.2.1. Modélisation et commande de l'onduleur de tension MLI.....35	
III.3.Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents.....38	
III .3.1 PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE PARK.....41	
III .3.2PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE CONCORDIA.....43	
III .3.3 MISE SOUS FORME DE L'EQUATION D'ETAT.....45	
III .4 conclusion46	

CHAPITRE IV

Simulation de système générateur photovoltaïque alimenté MSAP

IV .1Introduction47	
IV .2Simulation de système photovoltaïque global.....47	
IV .3Simulation de système globale.....49	
IV .4 la machines synchrones à aimants permanents.....51	
IV .5 RESULTATS DE LA SIMULATION DE MSAP.....51	
IV .6 CONCLUSION.....55	
conclusion Générale.....56	

Introduction générale

Introduction générale:

L'utilisation de l'énergie solaire dans notre pays est largement justifiée, et surtout dans le domaine du pompage solaire dans les régions isolées et arides (Sahara Algérien). À l'ère du développement durable, l'énergie photovoltaïque connaît une progression rapide en raison de son potentiel significatif comme source d'énergie renouvelable. En effet, plus de 22GW ont été produites en 2010 contre 0.4 GW en 1998. Cependant, le rendement de la conversion photovoltaïque reste relativement faible en plus du coût élevé des panneaux solaires et de leur installation. Pour amortir le coût de l'utilisation des systèmes solaires on met en œuvre des techniques d'optimisation. La MPPT (Maximum Power Point Tracker) reste une bonne approche dans la résolution des problèmes de la conversion de l'énergie solaire, elle consiste à faire fonctionner les systèmes photovoltaïques dans leur zone de puissance maximale.

La machine synchrone à aimants permanents est connue par sa robustesse qui permet de créer des commandes de vitesse et de couple avec précision et des performances dynamiques très intéressantes (actionneurs de robotiques, servomoteurs, entraînement à vitesse variable...etc.). Mais sa commande est plus compliquée que celle d'une machine à courant continu, car le système est non linéaire et il est très difficile d'obtenir le découplage entre le courant induit et le courant inducteur. Afin de faciliter notre étude on doit modéliser notre machine suivant les axes d-q donc, on abordera le passage du repère triphasé au repère biphasé par le biais de transformation de Park et on établira les équations électriques et mécaniques de la machine synchrone à aimants permanents.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à l'étude et l'optimisation du fonctionnement d'un système de pompage photovoltaïque, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres

Nous aborderons dans le premier chapitre généralités sur les systèmes photovoltaïques. En commençant par des notions sur le rayonnement solaire, et différents types de systèmes photovoltaïques.

Le deuxième chapitre nous allons étudier le générateur photovoltaïque. En commençons par l'étude des caractéristiques et des paramètres électriques d'une cellule solaire, ainsi que l'influence des différents paramètres électriques, mécaniques, et de la température sur les caractéristiques du module. et en finir avec Les techniques de commandes MPPT

Introduction générale

Le troisième chapitre, En commençant par les convertisseurs et la modélisation et commande de l'onduleur de tension MLI. Ainsi que concerne la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère (abc), ainsi que le passage au repère (d-q),(transformation de Park) et on termine le chapitre par une étude de l'association Machine-onduleur.

Le quatrième chapitre qui se résume une simulation complète de système générateur photovoltaïque alimenté MSAP.

Une conclusion générale achevé le travail, avec des perspectives quant à la continuité de ces investigations.

Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Au sein de matériaux semi-conducteur comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique, ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, c'est l'effet PV l'énergie est apportée par les photons (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique, ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

Le soleil est l'origine de toute forme d'énergie sur terre, que ce soit pour les énergies conventionnelles d'origine fossile comme les hydrocarbures ou pour les énergies renouvelables dont les plus importantes sont le solaire, l'éolien et la biomasse.

I.2. L'énergie renouvelable

I.2.1. Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. En **1839** : le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque. [1] Dans les années 1860 et 1870 du 19^{ème} siècle, le physicien français Auguste Mouchard développait des machines à vapeur fonctionnant à l'énergie solaire. [2] en **1873** : L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium. [3] **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. [4] **1958** : Une cellule avec de 9% est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [1] **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware. [3] **1983** : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [4].

I.2.2. Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

L'énergie solaire est convertie en énergie lumineuse par des panneaux solaires. L'unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteur et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [1]. Une cellule

est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. [5]

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (Donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dope P (compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction, il existe trois configurations de jonctions :

- une jonction PN (homo-jonction : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires. [6]

Lorsque les photons sont absorbés, des paires de trou électron peuvent être formées. Si ces porteuses de charge atteignent la proximité de la jonction le champ électrique dans la barrière de potentiel pousse les trous dans la zone des charges positives où ils sont accumulés et pousse les électrons dans la zone des charges négatives où ils sont accumulés aussi [7]. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. [8]

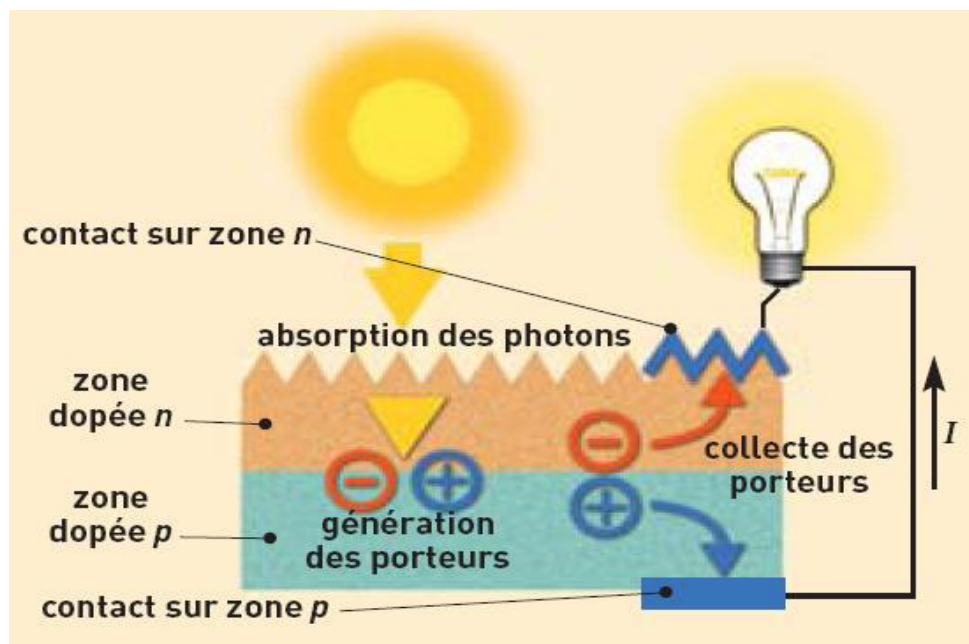


Figure (I.1) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. [9]

I.2.3 Le rendement PV :

Le rendement, des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} . [10]

$$\gamma = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{F \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{in}} \tag{I.1}$$

P : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

La densité de puissance incidente égale à $\frac{P_{in}}{A}$

A : section de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. [11]

I.2.4. Classement de cellule en fonction de leur rendement

- Silicium monocristallin
- Silicium poly cristallin
- Cellule a couche mince en cuivre-indium-sélénium(CIS)
- Cellule a couche mince en tellurure de cadmium(CDTe)

Matériau de cellule	Rendement	Surface PV
Monocristallin	13-15%	App.7m ²
Poly cristallin	12-14%	App.8m ²
CIGS	7-11%	10m ²
CdTe	8-11%	11m ²
multi jonction	8%	12m ²
Amorphe	5-7%	15m ²

Tableau(I.1) : rendements PV pour différents matériaux. [18]

I.2.5. Technologie utilisée :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. D'autres matériaux sont utilisés : tellurure de cadmium, arséniure de gallium, di sélénure de cuivre et d'indium (CIS). Ces technologies

sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de dix ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication. [12]

Il existe trois types principaux de cellules :

I.2.5.1. Les cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline qui s'approche le plus du modèle théorique : cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- ❖ Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- ❖ Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- ❖ Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans). [13]



Figure (I.2) : Cellule monocristalline. [14]

I.2.5.2. cellule en silicium poly cristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité prix). [12]

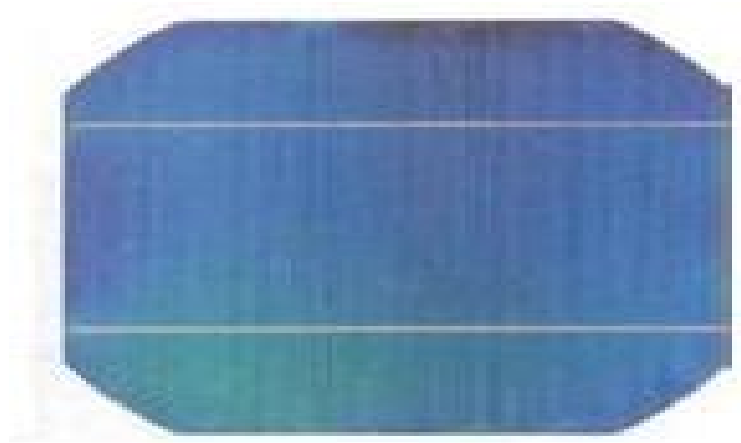


Figure (I.3) :Cellule poly-cristalline. [14]

I.2.5.3. Silicium amorphe:

Le silicium amorphe, apparu en 1976. Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire
- Fonctionne sous très faible éclairement.[13]



Figure (I.4) : Cellule amorphe. [3]

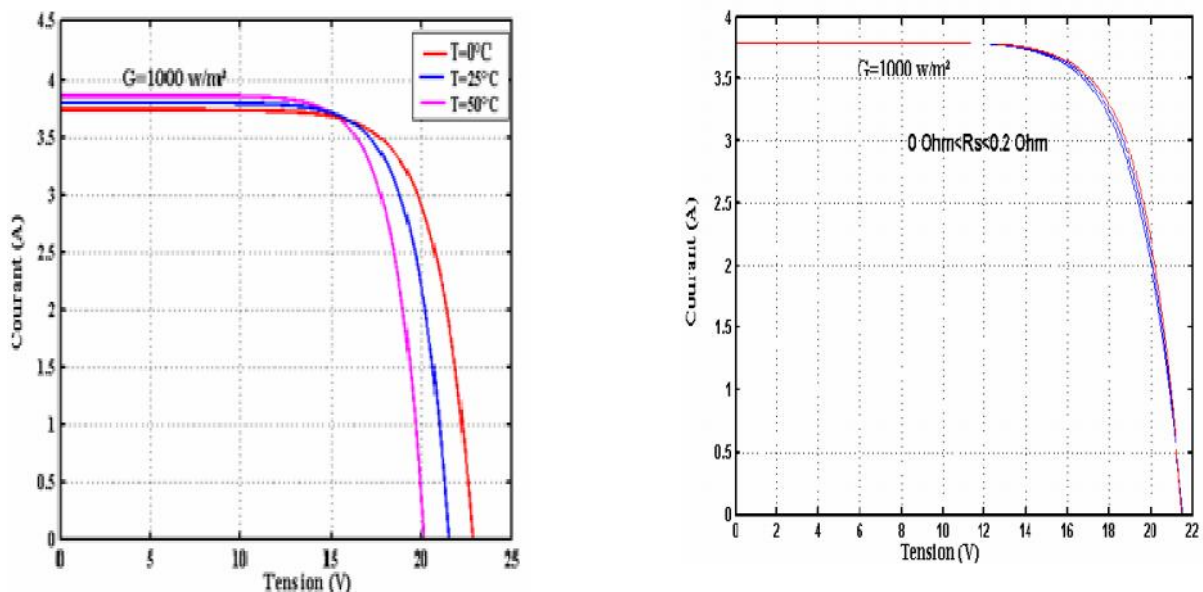
I.2.6. Module photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série ou en parallèle afin d'obtenir des performances électriques désirées, tels que la puissance, le courant de court-circuit (I_c) et la

tension en circuit ouvert (V_{oc}). [3]. On protège chaque cellule PV contre l'échauffement en lui montant une diode dite « diode by-pass » en parallèle qui court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable. [4]

I.2.6.1 CARACTERISTIQUE D'UN MODULE SOLAIRE I-V, P-V :

A partir du système d'équations non linéaire la une caractéristique fondamentale du module solaire type *MSX60* d'un nombre de cellule ($N_c = 36$) définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante. La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. L'augmentation de l'éclairement se traduit par le déplacement de la caractéristique I-V suivant l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que celui de la tension en court-circuit. En plein ensoleillement, le module n'étant connectée à aucun circuit, son potentiel est de l'ordre de 21.5 V pour une température de 25 °C. Pour une diminution de l'éclairement de 10 %, la tension produite chute à environ 0.47 V, soit de près 2.18 % de sa valeur initiale ; par contre le rendement varie assez peu avec l'éclairement. Ces courbes se tracent à température constante. [15]



I.2.7. Types de systèmes photovoltaïques :

Les systèmes PV Sont classés en trois types :

I.2.7.1. Systèmes autonomes :

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies. Dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Une tel installation doit être capable de fournir de l'énergie, y compris lorsqu'il n'y a pas de soleil (la nuit ou en cas de mauvais temps). Il faut donc qu'une partie de la production journalière des modules photovoltaïques soit stockée dans des batteries. Cette installation se compose d'un ou plusieurs modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'une ou plusieurs batteries et éventuellement d'un onduleur. [16]

I.2.7.2. Les systèmes raccordés au réseau :

Lerôle principal d'un système PV connecté au réseau électrique est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les générateurs PV est directement réinjecté sur le réseau électrique. La consommation des charges locales de l'habitat est assurée par le réseau électrique lui-même. Le réseau est utilisé en appoint de la production PV. Actuellement, il est interdit d'utiliser un élément de stockage de l'énergie dans ce type de systèmes. [17].

I.2.7.3. System hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaire ,qui sont également indépendantes des réseaux de distribution d'électricité .En pratique le générateur photovoltaïque est combiné a une éolienne on a un groupe électrogène à combustible ,ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie .une tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée .Un système hybride optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergie renouvelable et ou fossiles et des moyens de stockage associés. [1].

I.3. Gisement solaire :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.[19] De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme. L'Algérie a un gisement solaire de plus de 2000 kWh/m².an.[20].

Région	Région Côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heure/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau (I.2): Potentiel d'Energie solaire en Algérie. [21]

L'Algérie est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire, de par sa situation géographique il dispose d'un gisement solaire très important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrée sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre les 3900 heures sur les hauts plateaux du Sahara. Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 KW/h sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m² au nord et 2263 KWh/m² au sud du pays [21].

I.4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une description générale des systèmes photovoltaïque. Tous les éléments ont été introduits pour simplifier l'effet et le fonctionnement de système photovoltaïque et pour faciliter la conception. Nous pourrions ensuite on a donné notion sur le gisement solaire.

II.1. INTRODECTION :

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant mais ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale.

A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. [24]

Dans ce chapitre nous allons, exposé le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque à cet effet nous avons commencé par un aperçu sur les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement, le modelé mathématiques Puis le fonctionnement du convertisseur DC/DC et leurs types et les techniques nécessaires de MPPT.

II.2. MODELISATION ELECTRIQUE DU GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE :

L'association en série ou en parallèle des cellules solaires encapsulées sous verre formant ainsi un module photovoltaïque pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu.[23].

II.2.1.MODEL ELECTRIQUE DE BASE :

Le principe de l'effet photovoltaïque n'est autre que celui d'une diode, ainsi lorsque l'on éclaire la jonction PN, la cellule étant chargée par une résistance, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . Une cellule photovoltaïque dans l'obscurité se comporte donc comme une diode classique et elle obéit à la loi Shockley

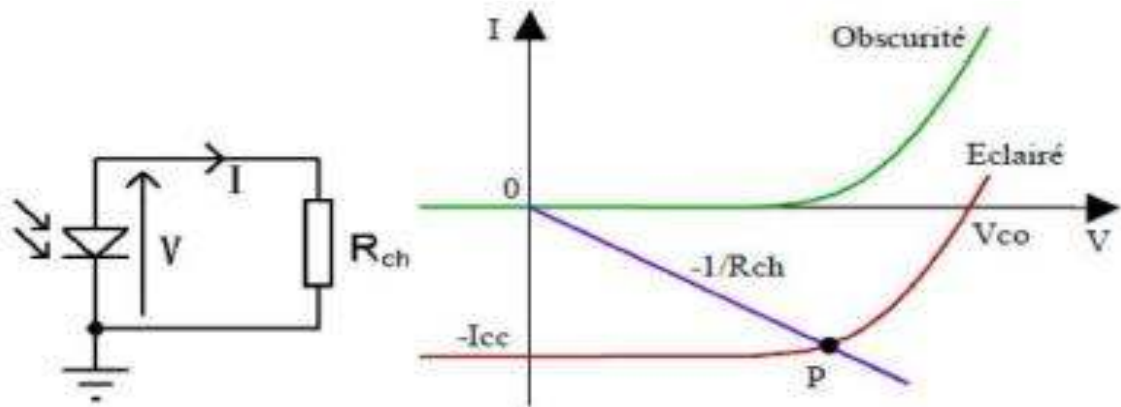


Figure II.4: *Approximation de la caractéristique courant-tension du panneau photovoltaïque*

La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode (idéale). En présence d'un éclairage, cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit). De même, elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension maximale de circuit ouvert).

II.2.2. MODELE A UNE DIODE (SIMPLE EXPONENTIELLE):

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [16]. [23].

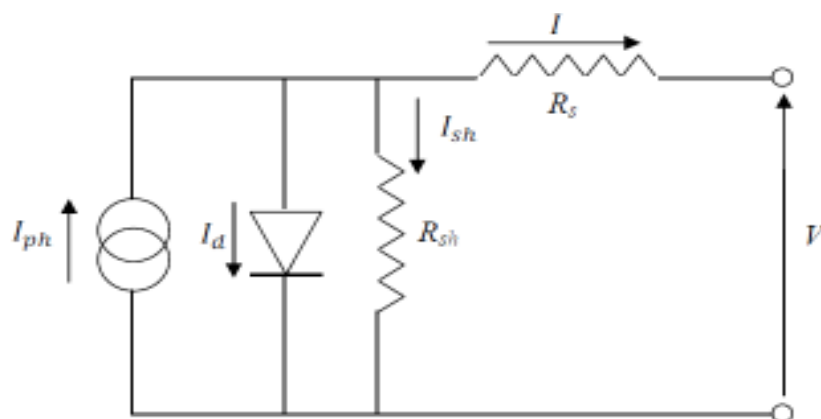


Figure II. 5 : *Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.*

- La résistance série (R_s) est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.
- La résistance parallèle (R_{sh}) rend compte des effets, tels que le courant de fuite par les bords de la cellule, elle est réduite du fait de la pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si cette pénétration est profonde).

Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

La caractéristique I-V du générateur PV est basée sur celle d'une cellule élémentaire modélisée par le circuit équivalent de la figure II-2 (largement utilisé). Ce circuit comporte une source de courant dépendante de l'éclairement et une diode en parallèle, ainsi qu'une résistance série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. Ce modèle appelé aussi modèle à quatre paramètres; il a été proposé par Townsend et Beckmann [18].[23].

la loi de nœud de Kirchhoff dans le circuit équivalent dans la figure (II.5 :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad \text{II.1}$$

I : courant généré par cellule

I_{ph} : le photon courant.

I_{sh} : le courant circulant dans la resi

I_d : le courant circulant dans la diod.

Le courant circulant dans la diode est donné par:

$$I_d = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{V_d}{V_t} \right\} - 1 \right] \quad \text{II.2}$$

A partir de la loi de maille :

$$V = V_d - R_s * I \quad \text{III.3}$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad \text{II.4}$$

Donc:

$$I = I_{ph} - I_o \left[\exp \left\{ \frac{(V+R_s I)}{V_t} \right\} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.5}$$

I : Courant généré par la cellule [A].

V : Tension à la borne de la cellule [V].

I_{ph} : photo-courant [A]

R_s : Résistance série [Ohm].

R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ohm].

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad \text{II.6}$$

V_t : tension thermique

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ [C] .

K : constant de Boltzmann..

T : température de cellule [k].

$$I_d = I_o \left[\exp \left\{ \frac{q(V+R_s I)}{nKT N_s} \right\} - 1 \right] \quad \text{II.7}$$

Le photon –courant est proportionnelle a l'irradiations et la température est donné par la relation suivant :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + K_i \times (T - T_n)] \quad \text{II.8}$$

G: Irradiation [W/m^2].

G_n :Irradiation de référence[W/m^2].

I_{sc} :courant de court- circuit[A].

T et T_n : Température de cellule et de référence [K]. k_i : coefficient de température du photo-courant (ou courant de court-circuit), il est souvent donné par le fabricant, il est en général positif mais très faible

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_0 = I_{rs}(T/T_n)^3 \times \exp \left[\left(\frac{q \times E_{g0}}{nK} \right) \times \left(\frac{1}{T_n} \right) - \left(\frac{1}{T} \right) \right] \quad \text{II.9}$$

Eg0 : Energie de ‘gap’ de la cellule.

Irs :courant de saturation inverse.

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}}{\exp\left\{\frac{qV_{oc}}{nKT_Ns}\right\} - 1} \quad \text{II.10}$$

Voc :la tension a vide.

$$I = \frac{G}{G_n} [I_{sc} + Ki \times (T - T_n)] - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V+R_s I)}{nKT_Ns} \right\} - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad \text{II.11}$$

II.3. ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR STATIQUE(CS) :

Principe de fonctionnement d’un étage d’adaptation DC-DC.

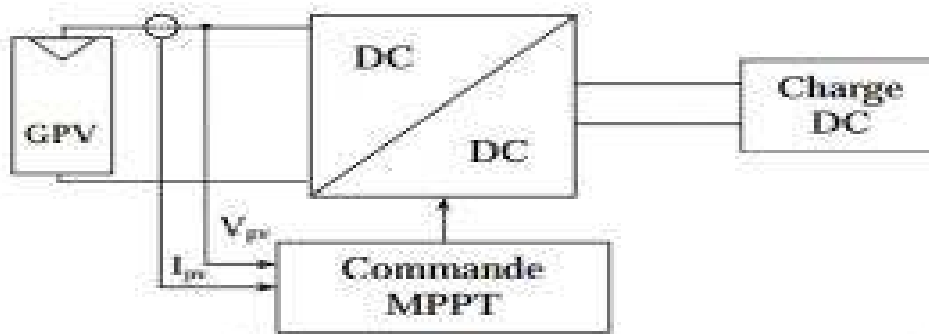


Figure II.1: *Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur DC/DC contrôlé par une Commande MPPT sur charge DC[24]*

Ce type de convertisseurs est utilisé pour transformer la tension continue en tension continue variable pour alimenter des appareils spéciaux. [24]

II.3.1. TYPE DE CONVERTISSEUR DC-DC :

On distingue trois types de convertisseurs DC-DC : Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_{out} > V_{in}$. Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_{out} < V_{in}$. Il y a aussi un type (BUCK-BOOST), mélange entre les deux précédents qui comporte plusieurs topologies comme le BUCK-BOOST. [25]

II.3.2. CONVERTISSEUR BUCK :

Dans l'étude du convertisseur Buck. La figure (II.2) montre la structure et les formes d'ondes du courant et de la tension de ce convertisseur qui est caractérisé par la disposition en série de l'interrupteur avec la source. [25] L'ondulation de la tension de sortie donnée respectivement par : [25]

$$V_s = \alpha \cdot V_e \tag{II.10}$$

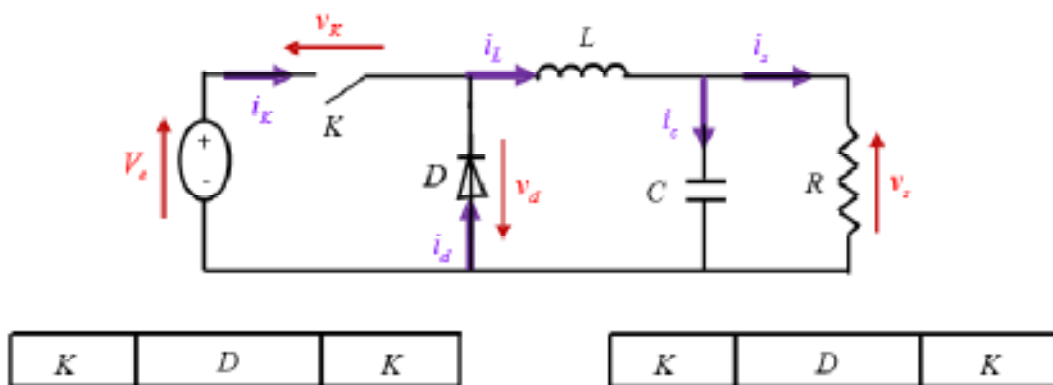
$$\Delta i_L = \frac{\alpha (1-\alpha) V_e}{L \cdot f} \tag{II.11}$$

$$\Delta V_s = \frac{\Delta i_L}{8C \cdot f} = \frac{\alpha (1-\alpha) V_e}{8C \cdot L \cdot f^2} \tag{II.12}$$

Le convertisseur est donc abaisseur en tension. Le courant moyen traversant l'inductance est égal au courant moyen dans la charge :

$$I_L = I_S \tag{II.13}$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes.



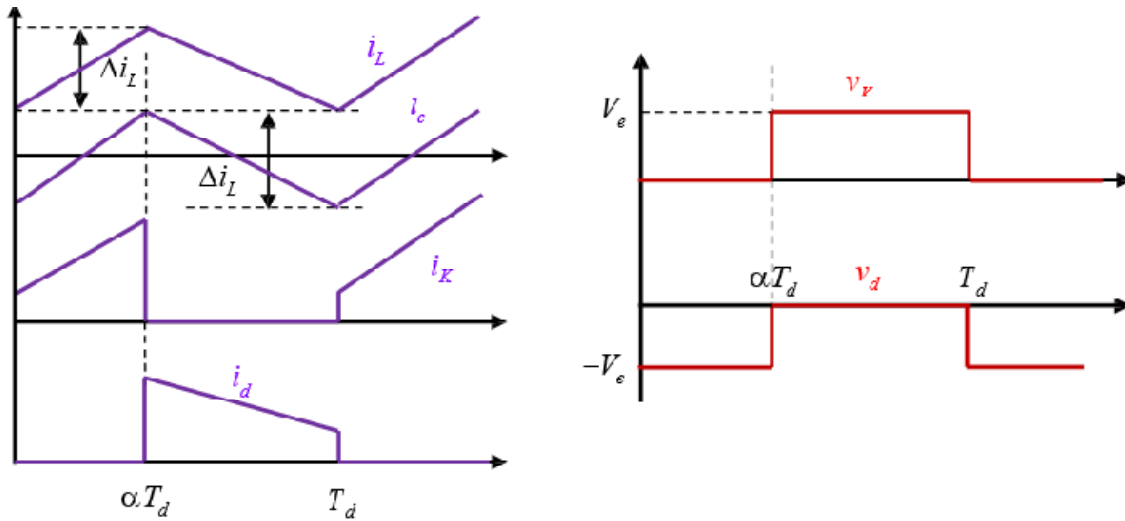


Figure II.2 : Formes d'ondes des courants et tensions du convertisseur Buck.

II.3.3. CONVERTISSEUR BOOST :

On considère un convertisseur DC-DC de type Boost. Il est composé essentiellement d'un interrupteur K (comme IGBT ou MOSFET) et d'une diode D l'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découplage T_d et de rapport cyclique variable a . La conduction des deux interrupteurs est complémentaire, quand K est fermé D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à aT_d et ouvert de aT_d à T_d . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue). On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure II.3 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les

Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < aT_d$), le circuit du convertisseur est (Figure II.4) : [25]

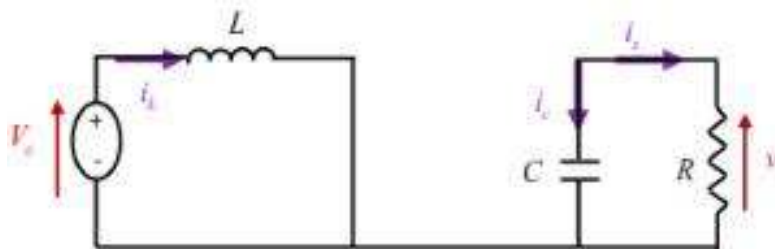


Figure II.3. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est fermé[25]

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c \text{II.14}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_c}{L} t \text{II.15}$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant $t = \alpha T_d$, le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{min} = I_{min} + \frac{V_c}{L} \alpha T_d \quad \text{III.9}$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert $\alpha T_d < t < T_d$ le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure II.4

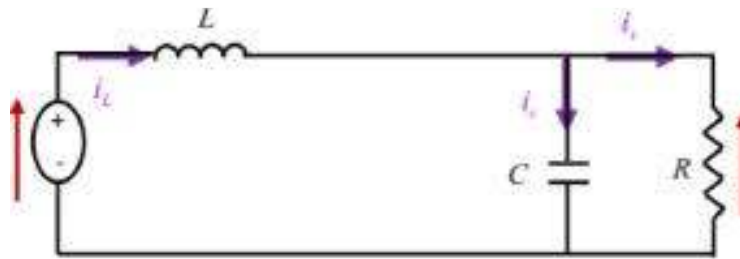


Figure II.4. Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur est ouvert[25]

Montré dans la Figure III.5. [25]

$$L \frac{di_L}{dt} = V_c - V_s \quad \text{II.16}$$

$$I_L = I_{min} + \frac{V_c - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad \text{II.17}$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_c - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad \text{II.18}$$

Soit $\Delta i_L = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant, on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad \text{II.18}$$

II.4. RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE(MPPT) :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin.

Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale.

La figure II.5 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. La commande MPPT est associée à un convertisseur statique permettant de faire une adaptation entre le GPV et la charge de telle sorte que la puissance générée correspond à sa valeur maximale et qu'elle soit transférée directement à la charge. [27] [26].

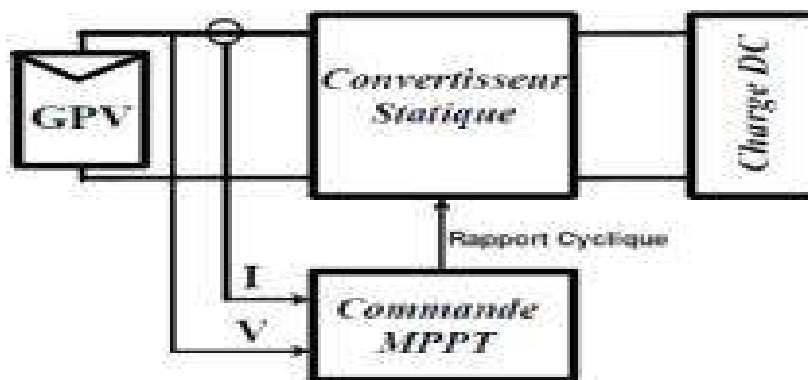


Figure II.5. : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT [26].

II.4.1.LES TECHNIQUES DE COMMANDES MPPT :

Il existe de nombreuses méthodes et techniques de commande MPPT disponibles dans la littérature dont on cite trois méthodes classiques : Perturbe and Observe (P&O), l'incrémentation de conductance (IncCon) et la méthode Hill Climbing [28] [26]. Actuellement il existe des méthodes basées sur l'intelligence artificielles à savoir : logique floue, et réseau de

neurones et les algorithmes génétiques.

❖ LA METHODE PERTURBE & OBSERVE (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension VPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance PPV qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure III.8, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension VPV engendre un accroissement de la puissance PPV, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être

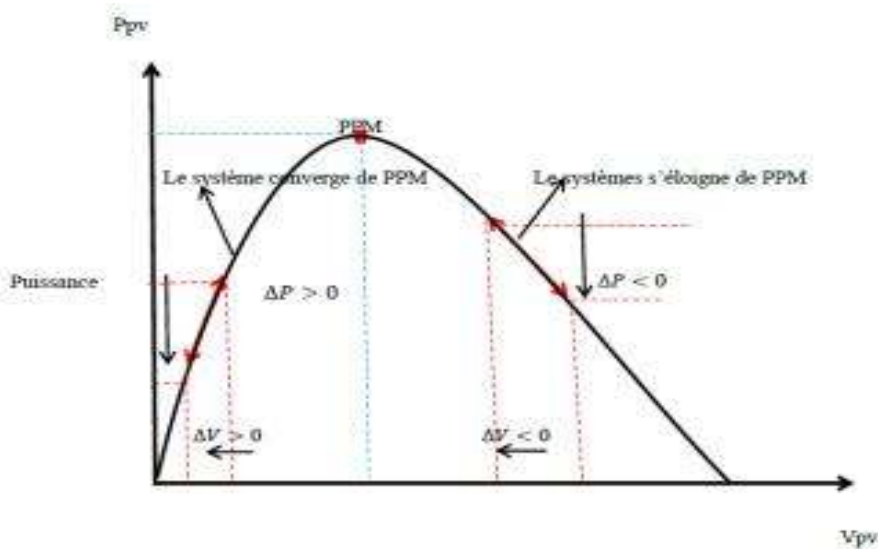


Figure II.6 :Schéma de convergence vers le PPM par P&O[26].

effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande [29] [26]. La figure II.7 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [26].

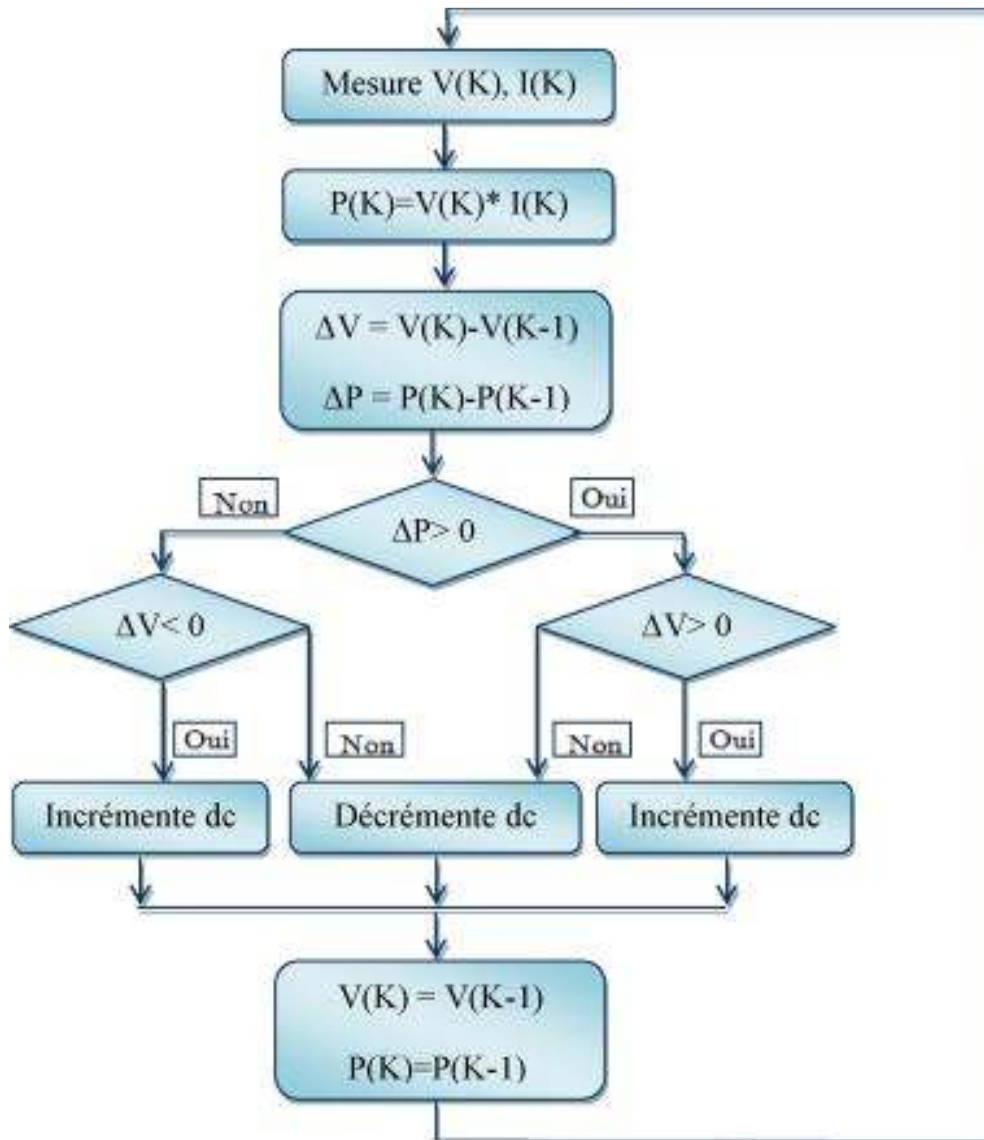


Figure II.7 : Algorithme de la méthode P&O[26].

A cause de la facilité de son implémentation, la méthode P&O est fréquemment utilisée malgré qu'elle présente des problèmes d'oscillations autour du PPM car la recherche doit être répétée périodiquement pour obliger le système à osciller autour du PPM. En plus, et pour des variations brusques des conditions climatiques ou/et de la charge, cette méthode présente parfois des erreurs d'interprétation dans la direction qu'il faut suivre pour atteindre le PPM [27] [26].

II.5. Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de générateur photovoltaïque et le fonctionnement du hacheur DC-DC (Boost) et le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT du générateur photovoltaïque. Dans la suite de notre chapitre nous allons aborder le modèle de la machine synchrone et le convertisseur DC-AC.

IV .1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons étudier par simulation sous MATLAB-Simulink, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) alimentée par un générateur photovoltaïque à puissance optimale, où nous présentons les différents résultats obtenus de système complet (GPV, convertisseurs commandés, onduleurs avec commandés MLI et machine synchrone).

IV .2.Simulation de système photovoltaïque

La Simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT « perturbation et observation ». Ce système est comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur survolteur « boost », une commande MPPT « perturbation et observation » ainsi qu'une charge. Les caractéristiques principales du module sont illustrées dans le tableau suivant :

Courant de court – circuit de cellule (STC) I_{cc}	0.0032A
Température nominale T_n (K)	298
La charge d'électron (C)	$1.6 \cdot 10^{-19}$
Facteur d'idéalité de diode	1.3
Constante de Boltzmann (J/K)	$1.38 \cdot 10^{-23}$
Nombre des cellules série	54
Nombre des cellules shunt	1
Résistance série R_s (Ohm)	221
Résistance shunt R_{sh} (Ohm)	415.405
Puissance nominale	200 w
Voltage maximale	26.4 V
Courant maximal	7.58 A
Voltage de circuit ouvert	32.9 V
Courant de court – circuit	8.21 A

Tableau IV.1. Les caractéristiques électriques de module PV étudié

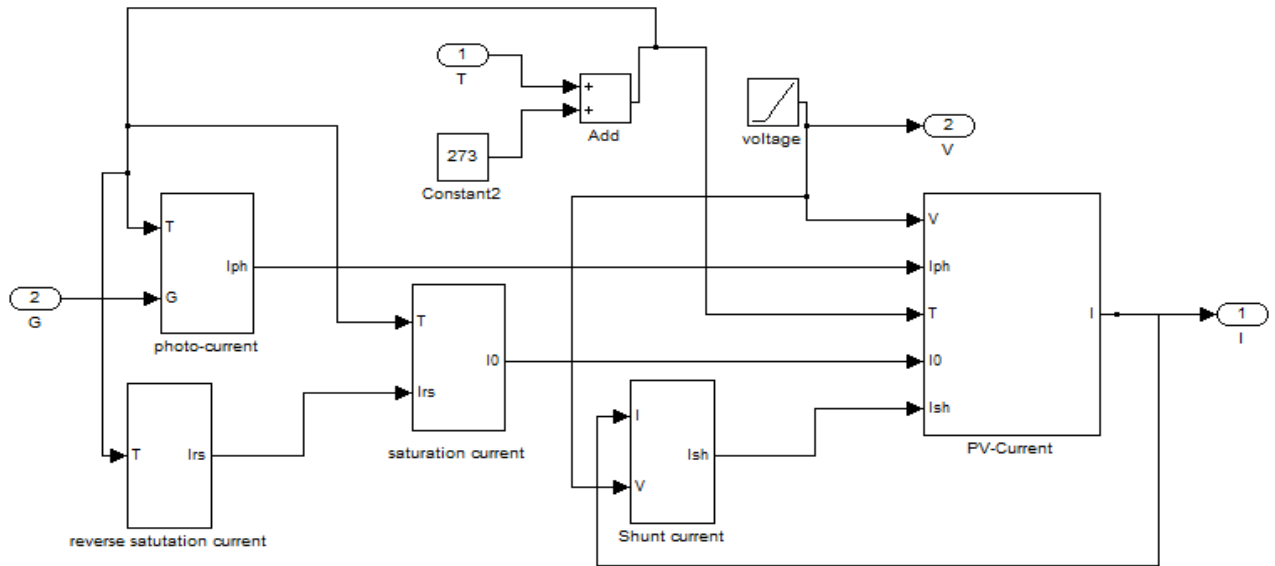


Figure IV.2. schéma Simulink de générateur photovoltaïque

Avec l'augmentation de l'éclairement, on constate à travers la courbe (I (v) que courant est fortement affecté par l'augmentation de sa valeur. Quant à la tension, elle est faible Quand Les courbes I-V se déplacent vers l'augmentation des valeurs, permettant à l'unité de produire plus d'énergie électrique Figure(IV .3)Ainsi que le courant est faiblement affecté par la températurealors qu'il affecte clairement la tension. Quant à l'énergie, elle augmente avec la baisse de température.

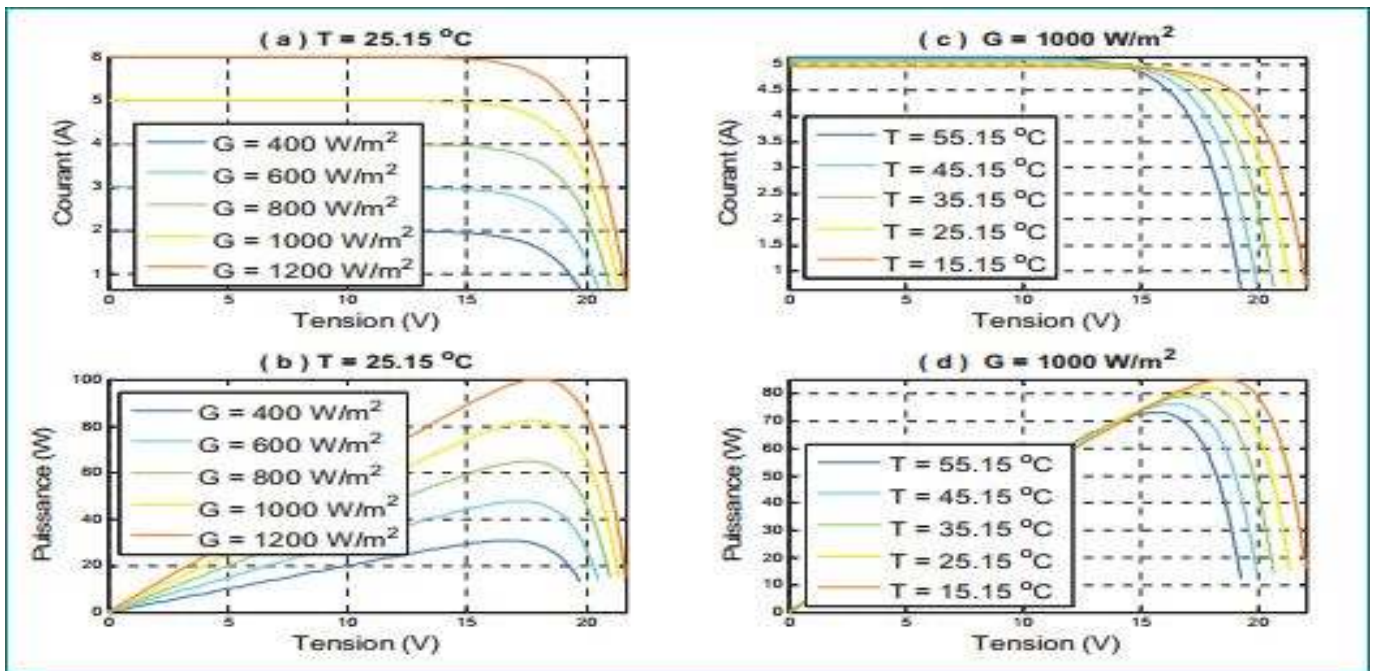


Figure. IV .3. Comportement des caractéristiques (IPV(VPV) et PV(VPV) sous l'influence de la température et de l'éclairement.

IV .3.Simulation de système globale

L'optimisation du système globale est effectuée par l'intégration entre l'onduleur et le générateur photovoltaïque un hacheur qui garantit l'extraction de la puissance optimale et ce grâce à l'algorithme MPPT.

La technique d'optimisation utilisée, soit la méthode de perturbation et observation Cette technique consiste en la maximisation de puissance électrique comme est illustrer dans la figure (IV.4)

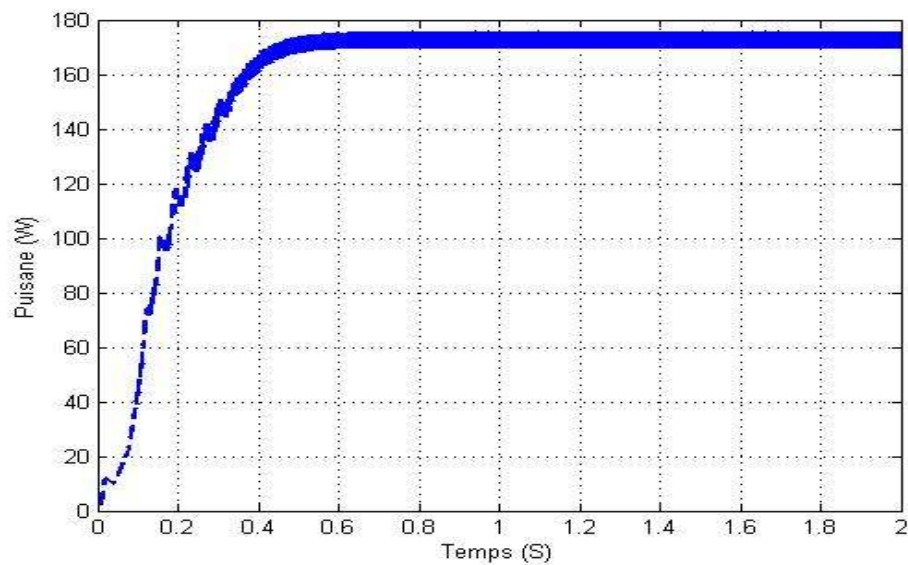


figure (IV.4) :

La forte évolution de l'onduleur de tension s'est appuyée d'une part sur le développement de composants à semi-conducteurs entièrement commandés, robustes et rapides, et, d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de "Modulation de Largeur d'Impulsions"(MLI). Cet onduleur transforme la tension continue issue des panneaux en une tension alternatifetripasée avec une fréquence variable. D'une façon générale le convertisseur statique (onduleur) joue le rôle d'interface entre source d'énergie électrique et le moteur.

La Figure (IV.5).montre le schéma l'onduleur de tension dans l'environnement SIMULINK effectuée à l'aide des modèles détaillés dans chapitre 03.

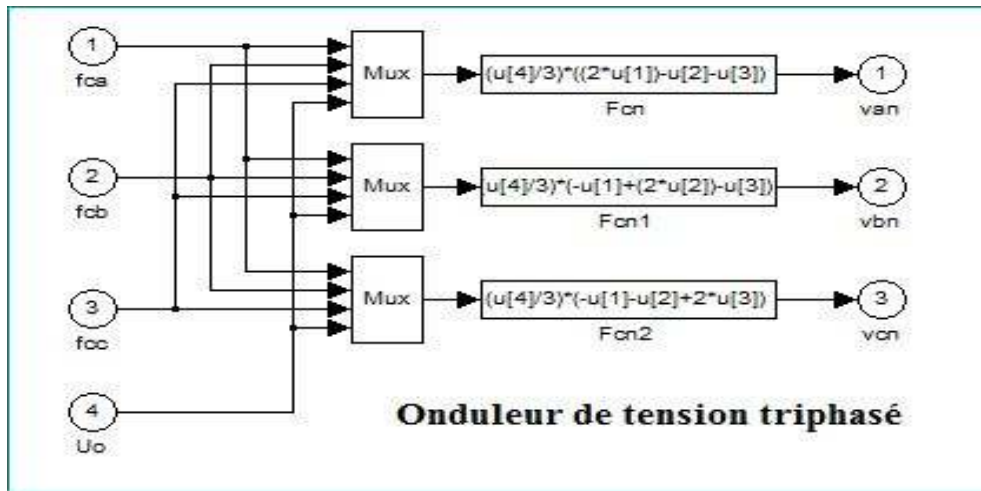


figure (IV.5). : “schéma de l’onduleur sur Simulink

La technique de modulation utilisé est les techniques largeurs d’impulsion MLI elle consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs de l’onduleur. Le gain de l’onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d’entrée. La forme d’onde de la tension de sortie d’un onduleur idéal doit être sinusoïdale. Cependant, cette forme d’onde n’est pas sinusoïdale en pratique et contient quelques harmoniques. Ce qui veut dire qu’il existe des harmoniques de tension. Le but serait donc d’obtenir à la sortie un signal avec un taux de distorsion harmonique le plus faible possible.

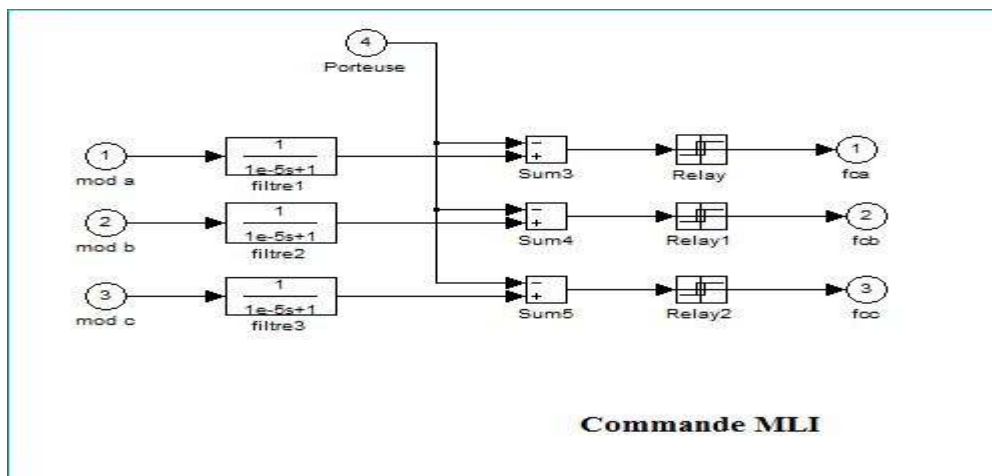


figure (IV.6) : “schéma de la commande MLI sur Simulink

IV .4. La machines synchrones à aimants permanents

Due de la complexité des équations du modèle on doit considère les hypothèses simplificatrices durant note simulation à savoir :

- ❖ L’absence de saturation dans le circuit magnétique.
- ❖ La distribution sinusoïdale de le FMM crée par les enroulements du stator.
- ❖ L’hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l’effet de peau.
- ❖ L’effet d’encochage est négligeable.
- ❖ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température

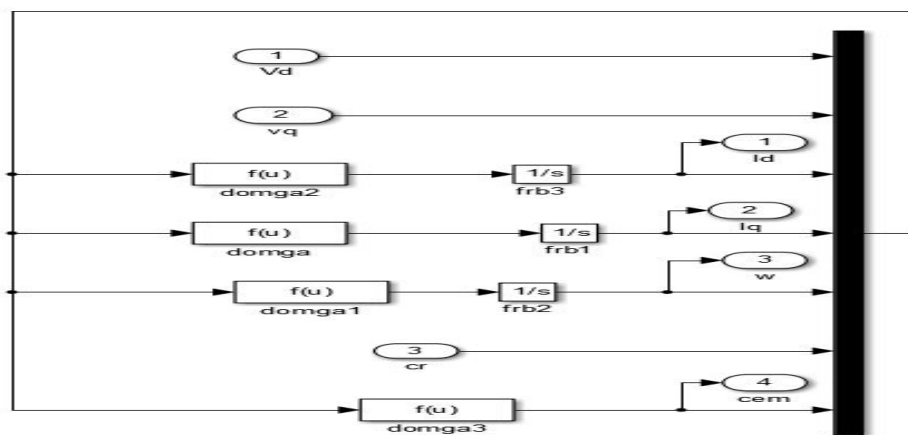


figure (IV.7) : schémaSimulink de la machine synchrone a aimentpermanent machine représenter dans le tableau suivant.

Les Caractéristique de la machine synchrone à aimant permanent sont :

fréquence	f	50	HZ
Résistance d’une phase statorique	R_s	1,4	Ω
Inductance directe	L_d	0,0066	H
Inductances en quadrature	L_q	0,0058	H
le moment d’inertie	J	0,02	Kg/m ²
Nombre de pôles	P	2
flux des aimants	φ	0,1564	Wb
Coefficient de frottement visqueux	f_v	0,0003881	Nm / (rad / s)

IV .5.RESULTATS DE LA SIMULATION de MSAP :

Les simulations présentées dans cette partie sont réalisées sur un générateur photovoltaïque alimenter une MSAP associée à un onduleur de tension par.L'implémentation sous système globale est illustréesur figure (IV.8)

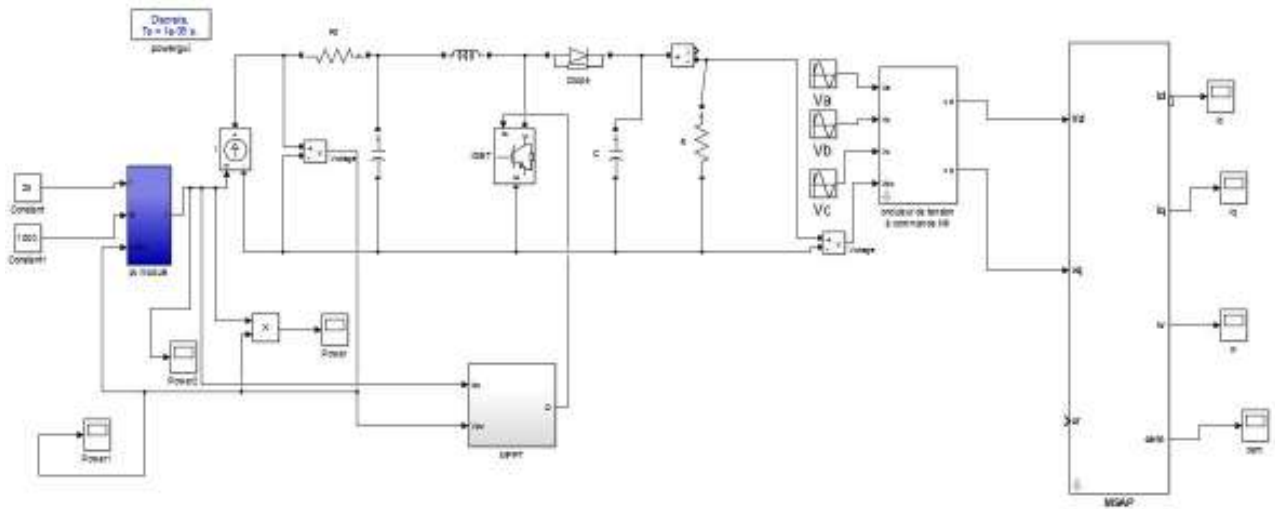


Figure (IV.8) : schéma Simulation de système globale

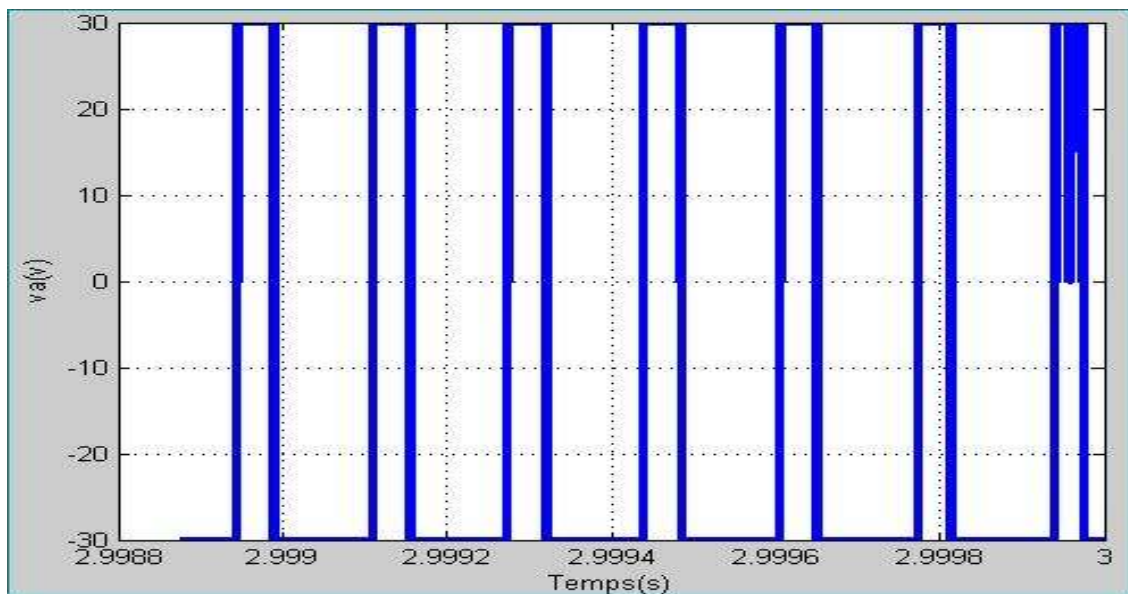


Figure (IV-9)la tension de sortie de l'onduleur

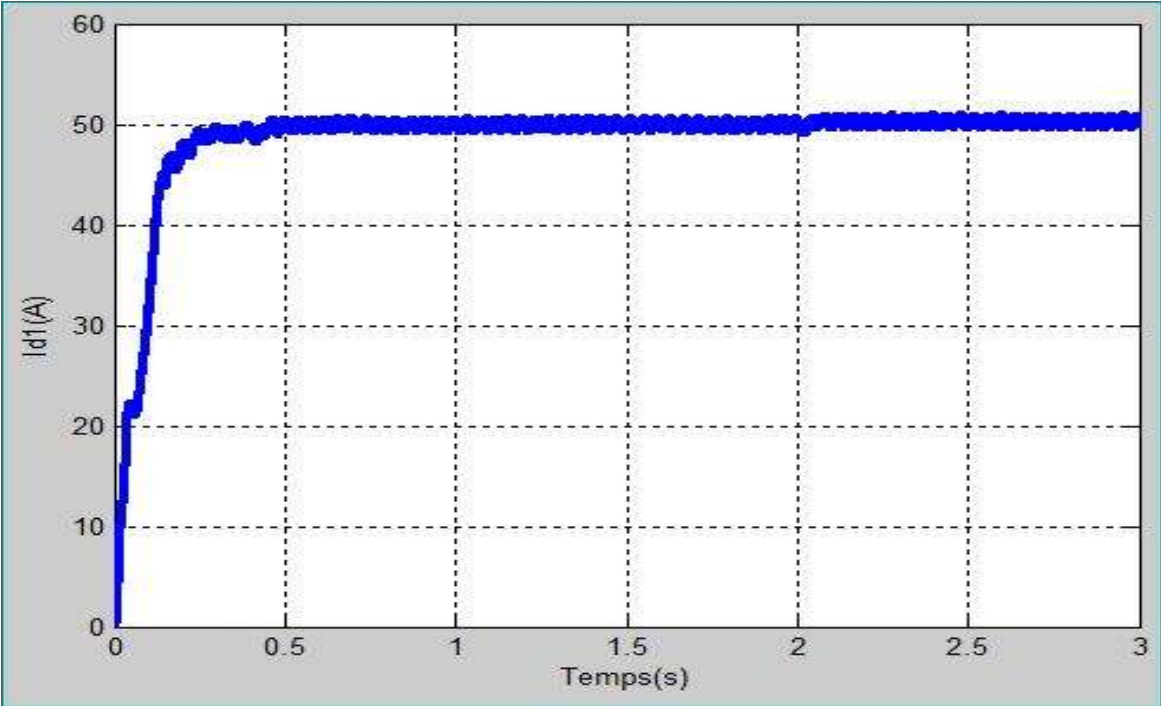


Figure (IV.10) :Résultats de simulation de courant id

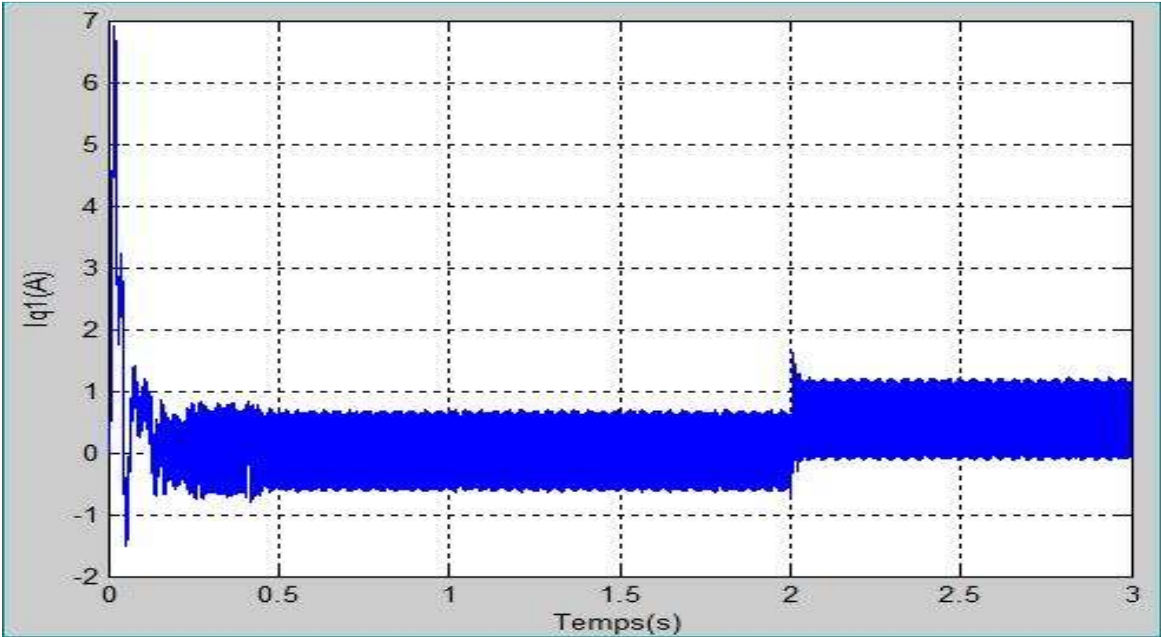


Figure (IV.10) Résultats de simulation de courant iq

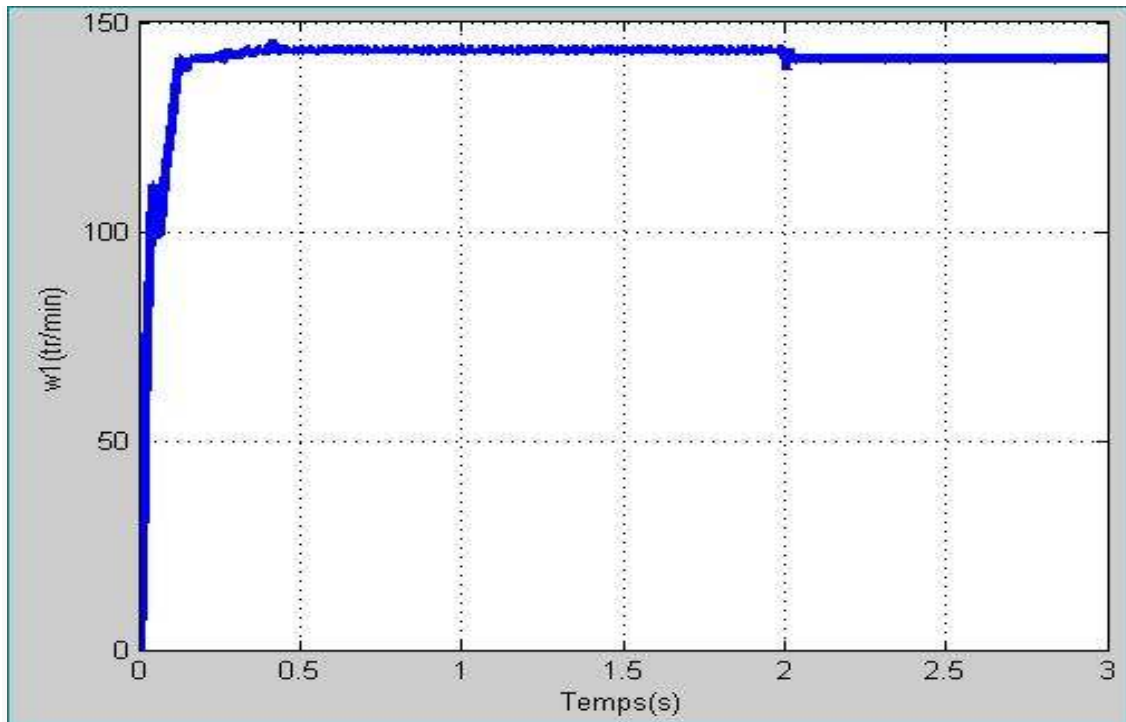


Figure (IV.11) : Résultats de simulation dew

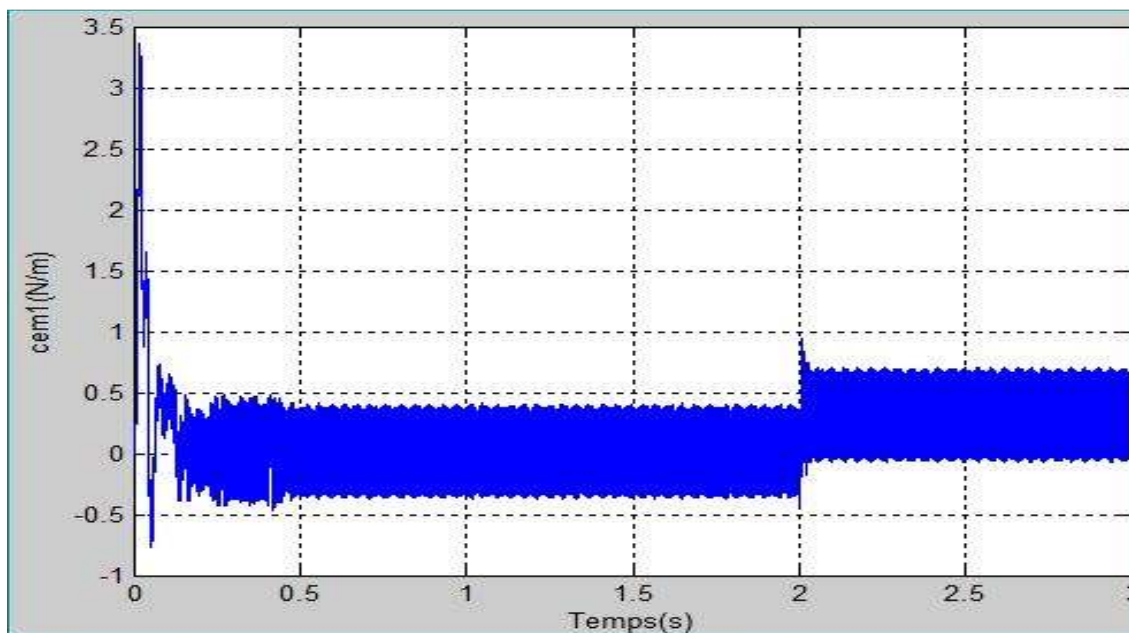


Figure (IV.11) : représente Résultats de simulation Cem.

Pour un ensoleillement fixe $E = 1000\text{W/m}^2$ nous avons les résultats suivante :Figure (IV-9) représente la tension de sortie de l'onduleur, Les figure (IV-10) montrent les composantes des courants direct i_d et quadrature i_q , le courant i_d est maintenue égale à 50A, la Composante i_q présente un pic très important au démarrage (14A) puis s'annule (pas de

couplée charge). La figure (IV.11) montre une augmentation intéressante de la vitesse et le courant du moteur d'un couplage indirecte par rapport à un couplage direct du système solaire ce qui explique le rôle de l'optimisation du système photovoltaïque.

IV .6 CONCLUSION

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié une structure photovoltaïque globale pour alimenter la machine synchrone et le fonctionnement en MPPT par l'algorithme P&O, pour l'adaptation de la puissance. La stratégie de commande MLI La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser les performances du système de production photovoltaïque.

III.1. Introduction :

La modélisation des machines électriques permet d'observer et d'analyser l'évolution de différentes grandeurs électriques d'une part et l'élaboration des lois de commande d'autre coté, la machine électrique présente un système complexe multi variable et non linéaire, pour cette raison la commande d'une machine électrique nécessite de prendre des hypothèses simplificatrices dans le modèle mathématique. L'approche actuelle de modélisation des machines électriques basée sur la théorie des deux axes qui transforme un système triphasé en un système biphasé équivalent, ce qui réduit la complexité du modèle et permet l'étude des régimes stationnaires transitoires.

Dans ce chapitre, on présentera la modélisation des composants reliés avec un système photovoltaïque (chapitre 02), un onduleur et une machine synchrone à aimants permanents.

III.2. Le convertisseur continu-alternatif (DC-AC) (onduleurs)

Les onduleurs sont des dispositifs appliqués pour convertir le courant continu en courant alternatif. La conception de l'assemblage du système globale est d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque, quelles que soient les perturbations d'éclairement et de la température, l'alimentation sous la tension alternative des appareils à partir des panneaux solaires nécessitent l'utilisation d'un onduleur assurant la conversion DC/AC, il peut être conçu à base de transistors de puissance ou à thyristors utilisés comme commutateurs de puissance.

Dans le système global, la connexion entre le générateur photovoltaïque et le moteur est fait par un onduleur, ce dernier permet de réaliser un transfert optimal de puissance entre le générateur et la machine sous les conditions variables de la puissance produite et de la demande en puissance. Ce transfert est contrôlé par variation de fréquence.

L'onduleur peut être utilisé à fréquence fixe, par exemple alimenter un système alternatif à partir d'une batterie, ou à fréquence (MLI) variable pour la variation de vitesse des machines électriques.

Dans notre système, on va utiliser un onduleur de tension à MLI triphasée constitué de trois bras formé d'interrupteurs électroniques choisis essentiellement selon la puissance et la fréquence d travail, chaque bras compte deux composants de puissance complémentaires

munis de diode montée en antiparallèle. Les diodes à roue libres assurent la continuité du courant dans la Machine une fois les interrupteurs sont ouverts:[34].

III.2.1. Modélisation et commande de l'onduleur de tension MLI

On peut représenter l'onduleur de tension considéré idéal selon la figure (III.1)

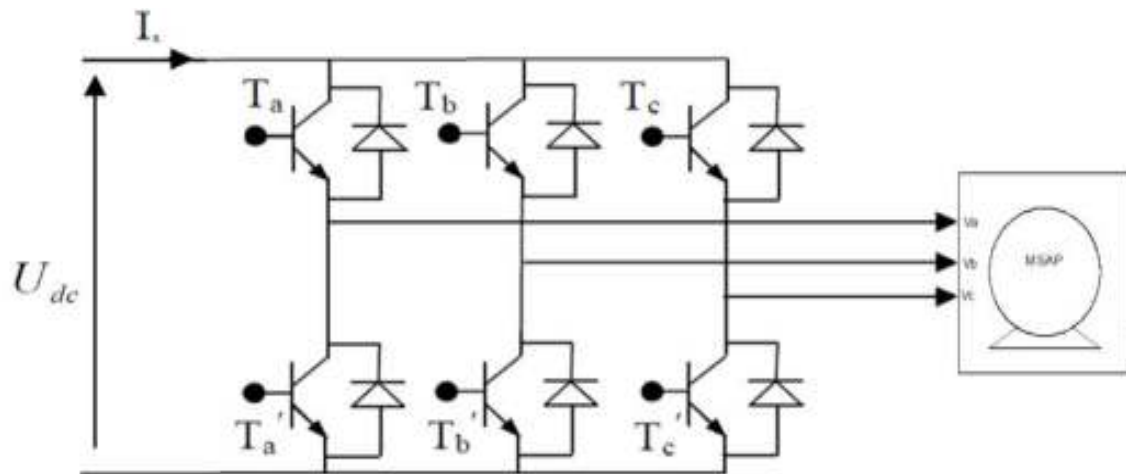
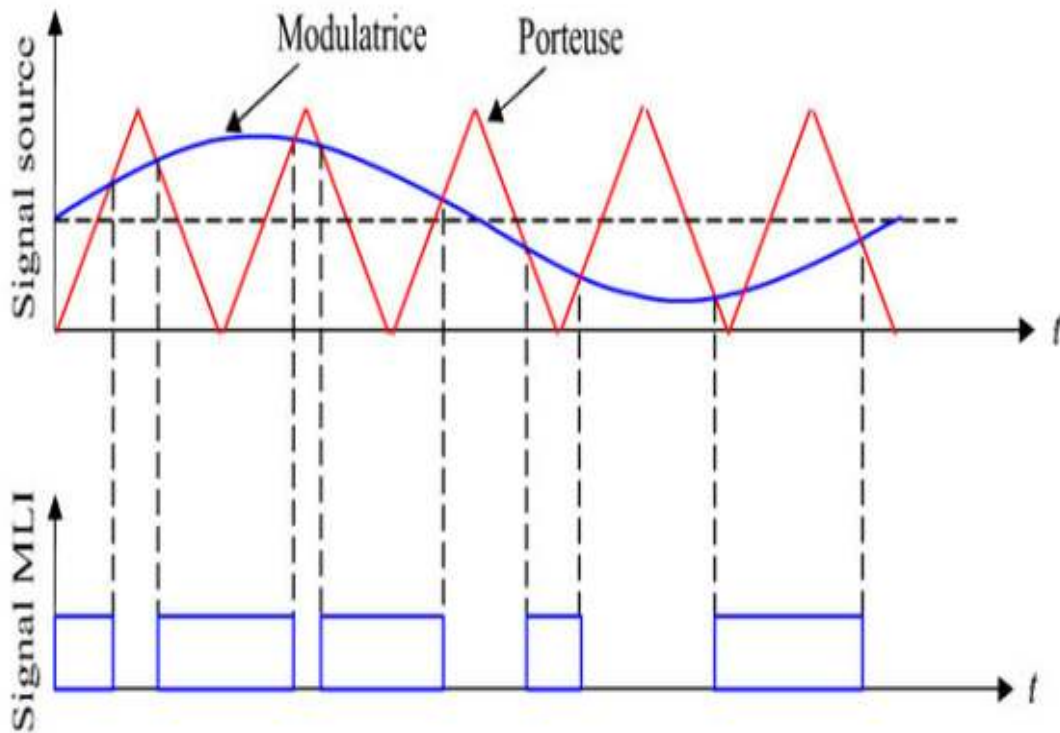


Figure (III.1) : l'association MSAP avec onduleur de tension.

Les commandes logiques qui sont associées telle que :

- ❖ Si=1 l'interrupteur T_i est passant et T'_i est ouvert
- ❖ Si=0 l'interrupteur T_i est ouvert et T'_i est passant.

Dans notre travail, l'onduleur est commandé par la technique (MLI) générée par une porteuse sous forme de dent de scie, La technique MLI appelée en anglais (Pulse With Modulation PWM), elle est utilisée pour générer un signal qui contrôle les interrupteurs, la MLI délivre un signal de commande en créneaux, il est générer par l'intersection de deux signaux, signal de référence, généralement sinusoïdale qui est de basse fréquence, et le signal de porteuse qui est de haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoïdale figure(III.2)[34].



Figure(III.2) : Principe de la commande MLI

Deux paramètres caractérisent cette commande:

$$1) m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{III.1})$$

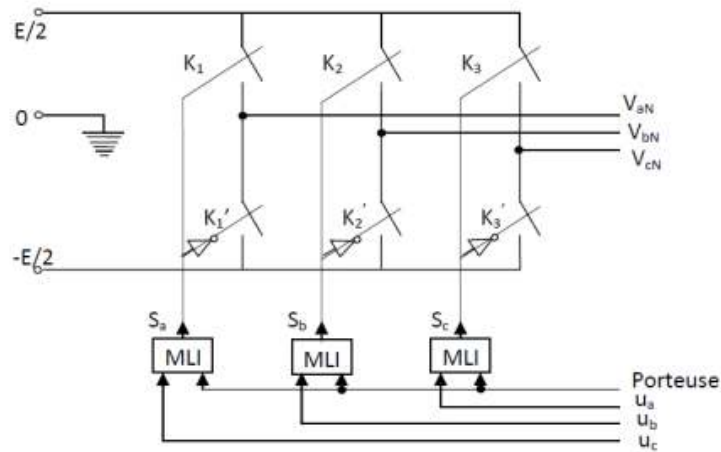
$$2) r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

m : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_a à la valeur crête V_p de la porteuse.

On prend en considération l'alimentation de l'onduleur comme une source parfaite, supposée être constituée par deux générateurs de f.e.m. égale à $\frac{E}{2}$ connectés entre eux par un point commun (0).



Figure(III.3) : schéma équivalent de l'onduleur à MLI

Les tensions aux bornes de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (III.3)$$

Les tensions V_{aN}, V_{bN} et V_{cN} forment un système de tension triphasé équilibré, avec :

$$V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 0 \quad (III.4)$$

$$\begin{cases} V_{aN} = V_{aO} + V_{ON} \\ V_{bN} = V_{bO} + V_{ON} \\ V_{cN} = V_{cO} + V_{ON} \end{cases} \rightarrow V_{aN} + V_{bN} + V_{cN} = 3V_{ON} + V_{aO} + V_{bO} + V_{cO} = 0 \quad (3.5)$$

On peut déduire :

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{aO} + V_{bO} + V_{cO}) \quad (III.6)$$

A partir de l'équation (2.32) et (2.33), on obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{aO} \\ V_{bO} \\ V_{cO} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur +1 ou -1 selon les conditions suivantes :

$$V_{a\ ref} \geq V_p \rightarrow S_a = 1 \sin \omega t \quad S_a = 0$$

$$V_{b\ ref} \geq V_p \rightarrow S_b = 1 \sin(\omega t - 120^\circ) \quad S_b = 0$$

$$V_{c\ ref} \geq V_p \rightarrow S_c = 1 \sin(\omega t - 240^\circ) \quad S_c = 0$$

Avec :

V_{ref} : Amplitude de référence.

V_p : Amplitude de porteuse.

Les branches V_{k0} peuvent être exprimées en fonction des switchs « S_k » par

$$V_{k0} = S_k \left(\frac{E}{2} \right) \text{ avec } k = (a, b \text{ et } c) \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{bmatrix} V_{aN} \\ V_{bN} \\ V_{cN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \text{ Matrice de connexion} \quad (\text{III.9})$$

III.3. Modélisation d'une machine synchrone à aimants permanents

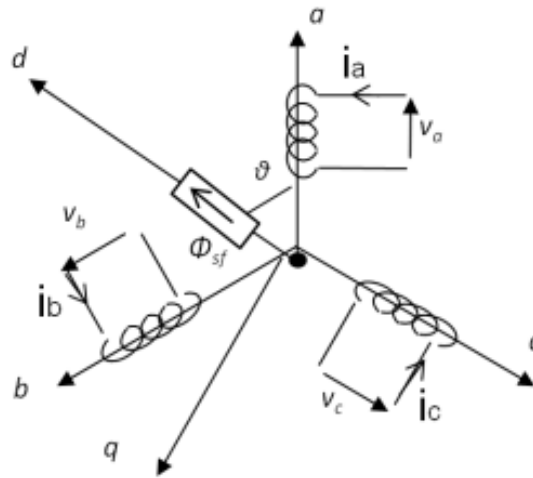
Avant d'établir le modèle mathématique d'une machine électrique on doit perdre quelques des hypothèses à savoir : [34], [37], [38]

- ❖ L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et d'encoche négligeable.
- ❖ La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- ❖ Les résistances des enroulements sont indépendantes avec la température et l'effet de peau négligeable.
- ❖ Le moteur possède une armature symétrique non saturée, les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements.
- ❖ La distribution des forces électromotrices, le long de l'entrefer, sont supposées sinusoïdale.
- ❖ Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.

EQUATION ELECTRIQUE

Les tensions, flux et courants statoriques triphasés, sont illustrées avec les notations vectorielles comme Suits : $[Vs]$, $[\varphi s]$ et $[is]$.

La figure (III.4) représente les enroulements d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents:



Figure(III4) : Représentation d'uneMSAP dans le repère triphasé

A partir de la figure, nous écrivons les équations de la machine synchrone dans le repère fixe au stator, en notation matricielle:

$$[Vs] = [Rs][is] \frac{d[\varphi s]}{dt} \tag{III.10}$$

$$[\varphi s] = [Ls][is] + [\varphi sf] \tag{III.11}$$

Avec $[Lss] = [Ls0] + [Lsv]$

$[Vs] = [VaVbVc]T$: Vecteur tension statoriques

$[is] = [iaibic]T$: Vecteur courants statoriques

$[\varphi s] = [\varphi a\varphi b\varphi c]T$: Vecteur flux statoriques

$$[Rs] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \\ 0 & 0 & Rs \end{bmatrix} : \text{Matrice résistances du stator}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance du stator}$$

$$[\varphi_s] = \varphi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} : \text{Vecteur flux engendré par l'aimant}$$

Avec:

φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux créée par l'aimant à travers les enroulements statoriques.

θ : Angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé défini par:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega d(\tau) \quad (3.12)$$

$$\text{Avec } \omega = p\omega_r \quad (3.13)$$

ω : La pulsation électrique.

p : Le nombre de paire de pôles de la machine ;

ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rotor).

Le modèle électrique doit être complété par les expressions du couple électromagnétique et de la vitesse, décrivant ainsi le mode mécanique.

✚ EQUATION ELECTROMAGNETIQUE

La connaissance du couple électromagnétique de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande donner par.

$$C_{em} = [i_s]^T \left[\frac{1}{2} \frac{d[L_{ss}]}{d\theta} \right] [i_s] + \frac{1}{2} \frac{d[\varphi_{sf}]}{d\theta} \quad (III.14)$$

Avec:

C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur.

✚ EQUATION MECANIQUE :

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\omega_r \quad (III.15)$$

Avec:

Cr: Couple résistant.

f: Coefficient de frottement.

J: Moment d'inerte du moteur..

LA PUISSANCE ABSORBEE

La puissance absorbée par la machine synchrone à aimants permanents est donnée par l'équation suivant :

$$P_a = 2\pi n_s \cdot C_{em} \quad (\text{III.16})$$

Pa: La puissance absorbée par le moteur en (w).

ns: la vitesse du champ tournant en (trs/s).

L'étude analytique du comportement des équations (3.10) et (3.11) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park.

III .3.1. PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE PARK

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère diphasé fictif, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park.[35],[36].

Le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application. La figure (III.5) présente la MSAP en modèle vectoriel (modèle de Park) : Le repère (Oa) est fixe. Le repère (d,q) tourne avec la vitesse de synchronisme ω_r .

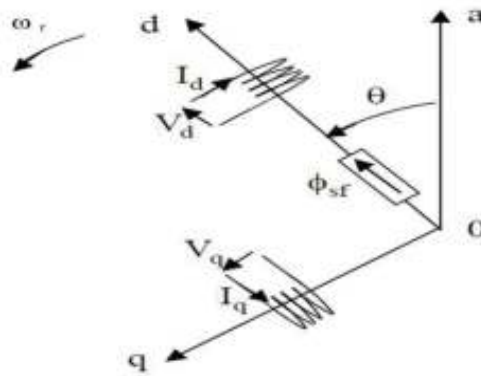


Figure (III.5) : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)

a) Passage direct : du triphasé au diphasé

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système diphasé (d,q) est donnée par

$$[X_{dq0}] = P(\theta) \cdot [X_{abc}]^T \tag{III.17}$$

$P(\theta)$: La matrice de passage direct de Park.

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{III.18}$$

X représente les variables considérées de la machine qui sont tensions, courants ou flux.

$$[V_{dq0}] = P(\theta) \cdot [V_{abc}]^T \tag{III.19}$$

$$[i_{dq0}] = P(\theta) \cdot [i_{abc}]^T \tag{III.20}$$

$$[\varphi_{dq0}] = P(\theta) \cdot [\varphi_{abc}]^T \tag{III.21}$$

X_0 : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

b) Passage inverse : du diphasé au triphasé :

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par:

$$[X_{abc}] = P(\theta)^{-1} \cdot [X_{dq0}]^T \quad (\text{III.22})$$

La matrice de passage inverse de park $P(\theta)^{-1}$ est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.23})$$

III.3.2. PRINCIPE DE LA TRANSFORMATION DE CONCORDIA

La transformation direct de CONCORDIA est déterminée par une matrice [c], elle correspond les vecteurs des axes (a,b,c) aux vecteurs des axes ($\alpha, \beta, 0$), elle est appliquée aux tensions, aux courants, et aux flux, $[V_{abc}], [I_{abc}], [\varphi_{abc}]$ aux , $[V_{\alpha\beta 0}], [I_{\alpha\beta 0}], [\varphi_{\alpha\beta 0}]$, \mathcal{LX} respectivement.

Le vecteur X_0 , représente la composante homopolaire.

✚ Passage direct : du triphasé au diphasé

Si on pose $\theta = 0$ dans les équations (III.18) et (III.23), les matrices de PARK deviennent les matrices de CONCORDIA :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Avec:

X_α, X_β : Représentent les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs X_a, X_b et X_c .

[C]: La Matrice direct de CONCORDIA, donnée par

$$[C] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

Passage inverse : du diphasé au triphasé

Le passage inverse de la transformation de CONCORDIA est défini par les relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [C]^{-1} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

Avec : $[C]^{-1}$ La Matrice inverse de CONCORDIA

$$[C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.27})$$

On a choisi le coefficient pour les matrices de PARK et CONCORDIA afin de conserver la puissance pendant le passage entre les deux référentiels.

PASSAGE DU REPERE (d, q) AU REPERE (α , β)

Le passage des composantes (α , β) aux composantes (d,q) est donné par une matrice de rotation exprimée par :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.30})$$

$[R]$: Matrice de passage (d, q) au (α , β).

Le modèle de la machine après la transformation de Park est donné par:

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - P\omega_r \varphi_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + P\omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (\text{III.31})$$

D'après la relation (2.21), on a le couplage entre les axes « d » et « q ».

Expressions des flux:

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d I_d + \varphi_{sf} \\ \varphi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

Avec:

L_d, L_q : inductances d'axes directe et en quadrature.

Le couple électromagnétique C_e dans le référentiel (d, q) est donné par l'expression suivante:

$$C_{em} = p[(L_d - L_q)I_d I_q + \varphi_{sf} \cdot I_q] \quad (\text{III.33})$$

L'équation mécanique développée par la machine est donnée par la relation suivante:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + f \cdot \omega_r = C_{em} - C_r \quad (\text{III.34})$$

Avec:

J: Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m²).

f: Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad).

C_r : Couple résistant (N.m).

ω_r : Vitesse mécanique (rad/s).

III.3.3. MISE SOUS FORME DE L'EQUATION D'ETAT

Considérons les tensions (V_d, V_q) et le flux d'excitation φ_{sf} comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_d, I_q), comme variables d'état. A partir des équations (2.21), (2.22), on peut écrire le système d'équations comme suit [36],[39] :

$$\frac{d[X]}{dt} = [A][X] + [B][U] \quad (\text{III.34})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & P\omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -P\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (\text{III.35})$$

Dans le cas d'une régulation de la position θ du rotor, il faut prendre celle-ci comme une nouvelle variable d'état et donc le nouveau modèle d'état s'écrit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & P\omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -P\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P\omega_r i_q \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P\omega_r i_d - \frac{\varphi_{sf}}{L_q} P\omega_r \\ \frac{\varphi_{sf}}{J} P i_q - \frac{(L_q - L_d)}{J} P i_q i_d - \frac{f}{J} \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix}$$

$\frac{d[X]}{dt}$: Vecteur de dynamique du système

[A] : Matrice d'état.

[X] : Vecteur d'état (avec $[X] = [I_d I_q]^T$)

[B] : Matrice d'entrée

[U] : Vecteur de commande (avec $[U] = [V_d V_q \varphi_{sf}]^T$)

III.4.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé les différents éléments convenablement tout l'ensemble du système globale telle que l'onduleur et la machine à aimant permanent ainsi la commande de l'onduleur MLI dans chapitre suivant on va simuler l'ensemble des résultats.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude de la commande MLI appliquée au moteur synchrone à aimant permanent qui est alimenté par un générateur photovoltaïque. Ce générateur fonctionne à sa puissance optimale avec l'utilisation du convertisseur DC-DC commandé par MPPT. Nous avons rappelé dans le premier chapitre le principe de la conversion photovoltaïque ainsi que les différents éléments de processus de la conversion photovoltaïque, et nous avons terminé par la description des configurations des systèmes photovoltaïques.

Nous avons présenté dans le chapitre II, en premier la modélisation de l'irradiation puis le modèle de la batterie (modèle CIEMAT) où nous avons montré le choix de ce modèle, les équation de modèle, le schéma bloc de simulation et quelques résultats de simulation de ce modèle. On s'est ensuite intéressé au générateur photovoltaïque avec ses différents modèles de puissance et électriques. En dernier, notre étude est consacrée au convertisseur DC/DC et DC/AC.

Nous sommes ensuite passés à la commande et l'optimisation qui fait l'objectif. Nous avons commencé par le principe de la recherche de point de puissance maximale de générateur photovoltaïque en citant les différents algorithmes de MPPT.

En effet, nous avons présenté au troisième chapitre, une étude générale sur les machines synchrones aimants permanents, les avantages et les domaines d'applications qui concernent et la problématique de la modélisation des machines synchrones à aimants permanents en se basant sur les équations électriques et mécaniques dans le repère (abc) et (d-q). le modèle mathématique de la machine obtenue par la transformation de PARK en tenant compte des hypothèses simplificatrices qui permettent de réduire la complexité du système. Nous avons établi un modèle de connaissance de l'ensemble Onduleur-MSAP lorsqu'elle est alimentée en tension. Les résultats obtenus montrent que le système d'association est bien défini et que la machine se comporte comme un système non-linéaire fortement couplé.

Le dernier chapitre, nous l'avons consacré à la simulation. Nous avons présenté certains résultats de simulation réalisées sous MATLAB-SIMULINK de système global étudié.

Reference bibliographie

- [1] : MAZOUZ.K (2011.2012), Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque, Mémoire de fin d'étude Université ABDERRAHMANE MIRA .Bejaia
- [2] : BRAHIMI.M (janvier 2019), Système de conversion de l'énergie photovoltaïque, institut des sciences et technologie, Centre universitaire SALHI AHMED .NAAMA
- [3] : (BONDHOUCHE, M et OUENNOUGHI, M ,2016), Gestion d'un système Photovoltaïque avec stockage, Diplôme master en électrotechnique, Université ABDERRAHMANE MIRA .Bejaia
- [4] : BOUKHLIF, H (juin2017), Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300KW, mémoire de master Université M4HAMED BOUGAR, BOUMERDES
- [5] : MOHAMMED, A (15/12/2014), étude et optimisation d'un système hybride eolien-photovoltaïque, diplôme de magister, université FERHAT ABBAS .SETIF
- [6] : SINGO, AT (3 février 2010), système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybrides pour l'habitat énergétique autonome, thèse de doctorat, école doctorale IAEM LORRAINE, université HENRI POINCARRE
- [7] : AZZEDINE, H, modélisation et commande d'un système photovoltaïque, mémoire en magister en automatique, université BADJA MOKHTAR, ANNABA
- [8] : SLAM FATEH, M, modélisation d'un système multi générateur, photovoltaïque interconnectés au réseau électrique, mémoire de master, université FARHAT ABBAS, SETIF
- [9] : GHENISSA, H (2013.2014), étude comparative de l'alimentation en électricité d'un site isole par voie classique et système PV cas de Wilaya de BISCRA, LABRECH-TOLGA-, mémoire de master, université MOHAMMED KHIDER, BISKRA
- [10] : BELCOUT, A (28.10.2014), étude de diagnostic des défauts fréquents aux systèmes PV par emploi de la caractéristique courant-tension, mémoire de magister, université de BECHER
- [11] : BENDJELLOULI, Z (28/06/2009), contribution à la modélisation d'une cellule solaire, mémoire de magister, université de BECHER

Reference bibliographie

- [12] : RAHMANI, N (06/05/2012), modélisation des panneaux solaire en vue de leur implémentation dans le circuit FPGA, mémoire de magister, université FERHAT ABBAS, SETIF
- [13] : MAOUEDJ, R (decembre2005) application de l'énergie PV au pompage hydraulique sur les sites de TLEMCEN et de BOUZAREAH, mémoire de magister, université ABOU BEKR BELKAID, TLEMCEN
- [14] : (DEGLA, M et BEN AHMED, B, 24/05/2017), dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire master professionnel, université KASDI MERBAH, OURGLA
- [15] : ZAROUR,L(10/07/2010), étude technique d'un système d'énergie hybride PV-éolien-hors réseau , thèse de doctorat, université MENTOURI, CONSTANTINE
- [16] : BOUZERIA, H (30 avril 2016), modélisation et commande d'une chaine de conversion photovoltaïque, université HADJ LAKHDER, BATNA
- [17] : FRANCOIS, RJ (4 janvier 2011), recherche d'optimum d'énergie pour charge/décharge d'une batterie a technologie avancées dédiées a des applications photovoltaïque, thèse de doctorat, université TOULOUSE3
- [18] : FALK, A et all(27 janvier 2010, photovoltaïque pour tous conception et réalisation d'installation, livre
- [19] : A. Méfit, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie, Revu. Energy. Ren. Vol. 2 (1999) 69-85
- [20] : MOUHOUS, S-CHAOUCHI, MEMOIRE DE MAGISTER Spécialité : Energies Renouvelables Option : Photo thermique Thème Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné Présenté
- [21] : HALOUANE, A(2016,2017), modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, mémoire de fin d'étude, université M'hamed BOUGARA, BOUMERDAS
- [22] : ALAIN, R (jan 2011), gisement solaire et transferts énergétique, master énergie renouvelable , université de CERGY PONTOISE
- [23] : studylibfr.com/doc/4289205/diffraction---site-gerald-vincent

Reference bibliographie

- [24] : Edmond Bauer, Marcel Moulin. La constante de la loi de Stefan. J. Phys. Theor. Appl., 1910, 9 (1), pp.468-490.
- [25] : Brouche, M(2010,2011), travaux pratique Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Beyrouth, LIBAN
- [26] : HAI, A et HAMMADOU, Etude de corrélation entre l'irradiation solaire et facteur météorologique, diplôme de master2 en électrotechnique (énergie renouvelable)
- [27] :
https://www.labri.fr/perso/billaud/travaux/Helios/Helios2/resources/fr02/Chap_2_FR.pdf
- [28] : KALED, A (mai-juin 2008), dispositif d'étalonnage du pyranometre, rapport de stage, master1 physique et ingénierie, université de REUNION
- [29] : Le soleil et son rayonnement Petros Axaopoulos TEI d'Athènes Grèce
- [30] : <https://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P16.HTM>
- [31] : AZIB, T (14 decembre2010), contribution à l'étude d'electro-generateur à pile à combustible, thèse de doctorat, UNIVERSITE PARIS-SUD XI Faculté des Sciences d'Orsay
- [32] : BOULOU, ch. (04/2015), le stockage d'énergie : conversion d'énergie en gaz combustible, livre, Transvalor - Presses des mines (4 mai 2015)
- [33] : CECILE PERA, M et all, (26juin 2013), composants électrochimique « électrolyseur, pile à combustible, supercondansateur, accumulateur, ouvrage,
- [34] MERZOUG Med Salah, Etude comparative des performances d'un DTC et d'unFOCd'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie.
- [35] T.Hualin and J. Chang, "Field Orientation and AdaptativeBackstepping for InductionMotor Control", Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Vol.4, pp. 2357 – 2363, Oct 3-7, 1999.
- [36]REZGUI SALAH EDDINE , Commande de machine électrique en environnement, Matlab/Simulink et Temps Réel, mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine, Algérie, année 2009.
- [37] I. Kanellakopoulos, P. V. Kokotovic and A. S. Morse, "Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 36, Issue 11, pp. 1241-1253, November1991.
- [38] M. CARRIERE Sébastien, Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone, Thèse de doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, année 2010.

Reference bibliographie

- [39] BEN FERDIA Abdelkader, Commande non linéaire d'un moteur synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, année 2006.
- [40] A. R. Benaskeur, A. Desbiens, "Backstepping-based adaptive PID control", IEE proc. In control theory and applications, Vol. 49, Issue 1, 2002, pp. 54-59